

Al-Mg 溶射鉄筋のコンクリート部材への適用性に関する基礎的研究

Fundamental study on applicability of Al-Mg metal spraying reinforcement for concrete member

北見工業大学 准教授 井上真澄

(研究計画ないし研究手法の概略)

1. 背景と目的

予防保全を目的として長期的維持管理やライフサイクルコスト(LCC)およびミニマムメンテナンスの観点から長期防食性に優れるアルミニウム・マグネシウム合金溶射(以下、Al-Mg 溶射と称す)を用いた新しい防食技術が研究開発されている¹⁾。現在、Al-Mg 溶射はその優れた防食性能を生かし、沿岸部の鋼橋や鋼桁端部の伸縮装置、支承、高力ボルトなどへの普及が図られており、今後優れた防錆・防食技術の一つとして構造物の長寿命化への貢献が期待されている。Al-Mg 溶射は、工場施工のほか、現場での施工も可能であることから、コンクリート構造の補強材である鉄筋にも適用可能と考えられるが、コンクリート中における Al-Mg 溶射を施した鉄筋の防食効果やコンクリート用補強材として用いた場合の力学的特性は不明である。

本研究は、厳しい腐食環境下に曝されるコンクリート構造物の耐久性向上に寄与する防食鉄筋の一つとして Al-Mg 溶射を施した鉄筋に着目し、コンクリート用補強材への適用性を明らかにすることを目的としている。Al-Mg 溶射鉄筋をコンクリート補強材として使用する場合、コンクリート中のアルカリ環境下において溶射合金の主体であるアルミニウムが浸食を受けるため、耐アルカリ性を有する封孔剤を塗布して Al-Mg 溶射皮膜を保護する必要がある。

そこで本研究では、耐アルカリ性を有するエポキシ樹脂系封孔剤を施した Al-Mg 溶射鉄筋のコンクリート用補強材としての適用可能性を明らかにするため、Al-Mg 溶射鉄筋のコンクリート中における耐食性ととも、コンクリート部材に用いた場合の力学性状を把握するため RC はりの静的曲げ載荷試験を行った。また、載荷試験に先がけ、使用する Al-Mg 溶射鉄筋の付着特性を把握するため、鉄筋の引抜き試験も同時に行った。

2. コンクリート中における耐食性評価

2.1 実験概要

本実験では、耐アルカリ型 Al-Mg 溶射鉄筋のコンクリート中における耐食性を把握することを目的として、JCI-SC3「塩分を含んだコンクリート中における補強用棒鋼の促進腐食試験方法-乾湿繰返し法-」に準拠した実験を行った。

Al-Mg 溶射の仕様を表-1 に、本実験で使用した鉄筋を表-2 に示す。耐アルカリ性を有するエポキシ樹脂系封孔剤は、既報告²⁾を参考に 1 種類選定した。その塗布量は、メーカー推奨の標準塗布量(160g/m²)および既報告²⁾を参考に 2 水準(80, 160g/m²)設定するとともに、封孔処理を施さない溶射鉄筋と普通鉄筋を含めて計 4 種類の鉄筋を使用した。母材には、丸鋼 φ13(SR235)を使用した。

図-1 に促進腐食試験の概要を示す。試験は、JCI-SC3 に準拠し、φ100×200mm の円柱コ

表-1 Al-Mg 溶射の仕様

金属溶射	アルミニウム(95%)・ マグネシウム(5%)合金
皮膜厚さ	180±40μm
溶射方法	プラズマアーク金属溶射 (TAPS 溶射)

表-2 促進腐食試験に用いた溶射鉄筋

略号	Al-Mg 溶射	封孔処理	封孔剤塗布量
N	—	—	—
MS0	○	—	—
MS80	○	○	80g/m ²
MS160	○	○	160g/m ²

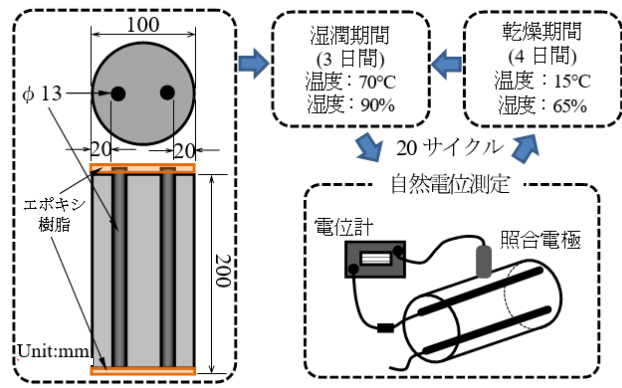


図-1 腐食促進試験概要

種類	Cl ⁻ =1.2kg/m ³ (腐食面積率)	Cl ⁻ =12kg/m ³ (腐食面積率)
N	(100%)	(100%)
MS0	(0%*)	(93%*)
MS80	(0%**)	(0%**)
MS160	(0%)	(0%)

注)* : Al-Mg 溶射皮膜が全域に渡って損傷 ** : Al-Mg 溶射皮膜が部分的に損傷

図-2 鉄筋腐食状況(20 サイクル終了後)

ンクリート供試体中に Al-Mg 溶射を施した丸鋼をかぶり高が 20mm となる位置に 2 本配置した。コンクリートの使用材料は、セメントに普通ポルトランドセメント(密度: 3.16g/cm³)、細骨材に幕別川産陸砂(表乾密度: 2.61 g/cm³)、粗骨材に北見産砕石(表乾密度: 2.84 g/cm³、最大寸法: 20mm)、混和剤として AE 剤(天然樹脂酸塩)を用いた。コンクリートの水セメント比は 66%とし、目標スランプは 10±2.5cm、目標空気量は 4.5±1%とした。コンクリートの塩化物イオン含有量は、1.2kg/m³および 12kg/m³となるように、NaCl(一般試薬)を用いて調整した。供試体は、打込み後材齢 2 日で脱型し、材齢 28 日まで 20±1°C、85±5%RH の恒温恒湿室内にて封緘養生した。

促進腐食試験は、湿潤期間(温度 70°C、相対湿度 90%)が 3 日間、乾燥期間(温度 15°C、相対湿度 65%)が 4 日間を 1 サイクルとする乾湿繰返しを 20 サイクルまで行った。1 サイクル終了毎に、鉄筋の自然電位およびクラックスケールを用いてコンクリートのひび割れ幅を測定した。鉄筋の自然電位は、各鉄筋の最小かぶり(20mm)位置に照合電極を設置し測定した。また、20 サイクル終了時点で供試体を解体し、鉄筋を取り出した。その後、鉄筋表面に生じた発錆の状況を透明シートに複写し、錆の部分に黒く塗りつぶしたシートをスキャナで読み込み、画像処理により腐食(発錆)面積の測定を行った。

2.2 実験結果および考察

図-2 に 20 サイクル終了時点における鉄筋の腐食状況および腐食面積率を示す。普通鉄筋では、いずれの塩化物イオン含有量においても試験片全域に渡って腐食が観察された。また、封孔処理を施していない溶射鉄筋 MS0 では、塩化物イオン含有量 12kg/m³ の場合に

全域に渡って腐食が観察された。MS0 は、溶射皮膜を保護する封孔処理を施していないため、セメント水和生成物である水酸化カルシウムと溶射皮膜の主成分であるアルミニウムが液相反応により水素を発生し、溶射皮膜が浸食を受けたことによると考えられる。したがって、コンクリート中では Al-Mg 溶射皮膜を保護する適切な封孔処理が必要であると考えられる。

一方、耐アルカリ性を有するエポキシ樹脂系封孔剤を塗布した溶射鉄筋 MS80 と MS160 では、鉄筋腐食は確認されなかった。しかし、MS80 では、部分的な Al-Mg 溶射皮膜の剥がれを確認した。これに対して MS160 では、封孔剤表面での変状や溶射皮膜の剥がれ等は全く確認されず、良好な耐食性を有することを確認した。この封孔処理層は、コンクリート打込み後の液相条件下において Al-Mg 溶射皮膜を保護する役割を果たすとともに、硬化後のコンクリート中においても鉄筋腐食に寄与するものと考えられる。また、塩化物イオン等の劣化因子の作用に対しては、封孔処理層に加えて Al-Mg 溶射皮膜が有する防錆・防食効果が重層的に機能するものと考えており、今後海洋環境下における曝露実験を実施し長期的な耐食性を検証する予定である。




3. コンクリート中における耐食性評価

3.1 実験概要

本実験では、耐アルカリ性を有するエポキシ樹脂系封孔剤を塗布した Al-Mg 溶射鉄筋のコンクリートとの付着性をはあくするため、土木学会規準「引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法(案) (JSCE-E-503-2013)」に準拠した実験により行った。

表-3 に実験に用いた鉄筋の仕様を示す。促進腐食試験の結果を踏まえて、良好な耐腐食性が得られた MS160 に加えて、耐アルカリ性に対する安全性を考慮し封孔剤を 200g/m³ とした MS200 を使用し、普通鉄筋 N と比較した。母材となる異形鉄筋には、D13(SD345)のものを使用した。封孔剤には、前述した耐食性試験と同じく耐アルカリ性を有するエポキシ樹脂系塗料を用いた。

表-3 引抜き試験に用いた鉄筋

略号	Al-Mg 溶射	封孔剤 (塗布量)	外観状況
N	—	—	
MS160	○	○(160g/m ²)	
MS200	○	○(200g/m ²)	

引抜き試験に用いるコンクリート立方体供試体の一辺の長さは 150mm とした。鉄筋とコンクリートの付着区間は自由端側に設け、その長さは鉄筋 (D13) の直径 (D) の 4 倍 (4D=52mm) とした。コンクリートの使用材料は 2 章で用いたものと同様である。試験時の目標圧縮強度を 30.0±3.0N/mm² として配合設計を行い、水セメント比は 65% とした。目標スランプは 10±2.5cm、目標空気量は 4.5±1% とした。コンクリート打込み後、材齢 2 日で脱型し、その後材齢 28 日まで 20±2℃ の水中で養生した。養生終了後、直ちに引抜き試験を行った。なお、供試体は各要因につき 3 体ずつ作製した。荷重は、鉄筋の引張応力度の増加が毎分 50N/mm² 以下となる載荷速度で引抜き試験を実施した。すべり量は、自由端側の鉄筋とその周辺のコンクリートにダイヤルゲージを取り付け、相対変位により測定した。

3.2 実験結果および考察

図-3 に引抜き試験で得られた付着応力～すべり曲線を示す。図中の各曲線は、各 3 体を平均化したものである。また、この結果に基づき、最大付着応力度を整理したものを図-4 に示す。付着応力～すべり曲線より、エポキシ樹脂系封孔剤を塗布した溶射鉄筋 MS160

と MS200 は、普通鉄筋 N と比較すると載荷初期からのすべり量が若干大きい傾向を示した。しかし、最大付着応力度は、両溶射鉄筋ともに普通鉄筋 N よりも大きくなっており、コンクリートとの良好な付着性が確認された。

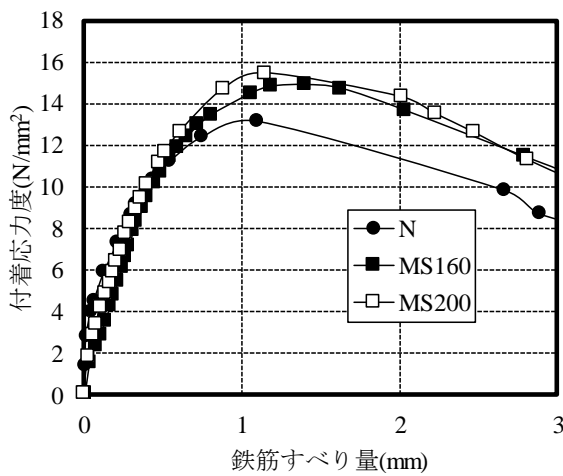


図-3 付着応力～すべり曲線

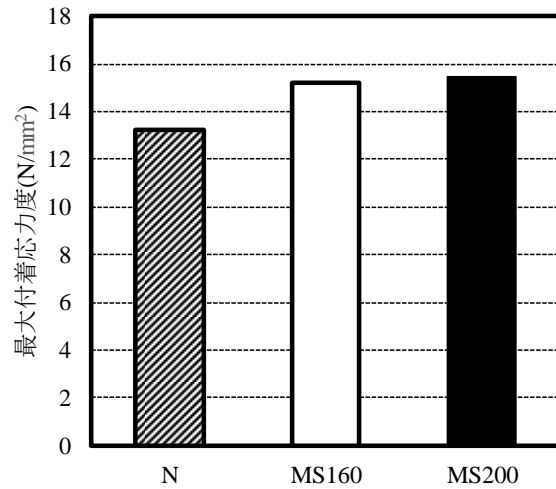


図-4 最大付着応力度

4. RC はりの静的載荷試験

4.1 実験概要

本実験では、Al-Mg 溶射鉄筋を用いたコンクリート部材の基礎的な力学性状を把握することを目的として、RC はりの静的曲げ載荷試験を行った。RC はりの補強材に用いる Al-Mg 溶射鉄筋の仕様は、上述した試験の結果を踏まえて MS160 と MS200 を選定し、普通鉄筋 N を用いた RC はりと比較検討した。

使用材料は、セメントに早強ポルトランドセメント(密度：3.14g/cm³)を使用し、骨材および混和剤については 2 章で用いたものと同様である。水セメント比は 66%とした。打込み後、材齢 1 日で脱型し、その後材齢 7 日まで 20±1℃の恒温室内で散水養生を行った。載荷試験時のコンクリートの圧縮強度は 27.1N/mm²であった。

図-5 に RC はり供試体の概要および載荷方法を示す。供試体寸法は 100×200×1500mm とし、引張鉄筋には D13(SD345、 $f_y=360\text{N/mm}^2$) を 2 本配置した。有効高さは 170mm、引張鉄筋比は 1.49%である。また、曲げ破壊に先行してせん断破壊が先行しないように、せん断スパンにはスターラップとして $\phi 6$ (SR235、 $f_y=300\text{N/mm}^2$) を 85mm 間隔で配置した。

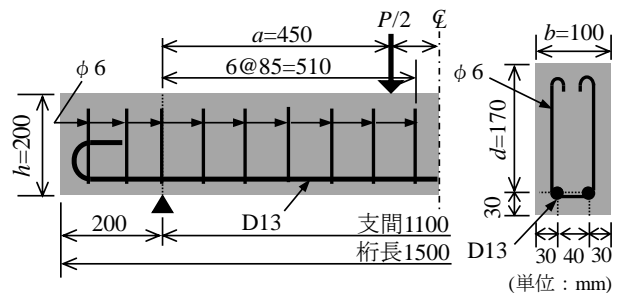


図-5 RC はり供試体概要

4.2 実験結果および考察

図-6 に荷重と支間中央たわみの関係を示す。図中に静的曲げ載荷試験の結果も示した。ひび割れ発生荷重はいずれのケースも 17.5kN であり、降伏荷重および最大荷重についても概ね同様な値となった。また、荷重～支間中央たわみ曲線についても、概ね同様な傾向を示している。破壊は、両供試体ともに引張鉄筋降伏後、曲げスパン圧縮部コンクリートが圧壊して終局に至った。図-7 に静的曲げ試験後の各供試体のひび割れ状況を示す。溶射の有無にかかわらず、ひび割れの発生状況にも大きな差異は認められなかった。

以上より Al-Mg 溶射鉄筋は、コンクリート部材の補強材として適用可能性を有すると考えられる。

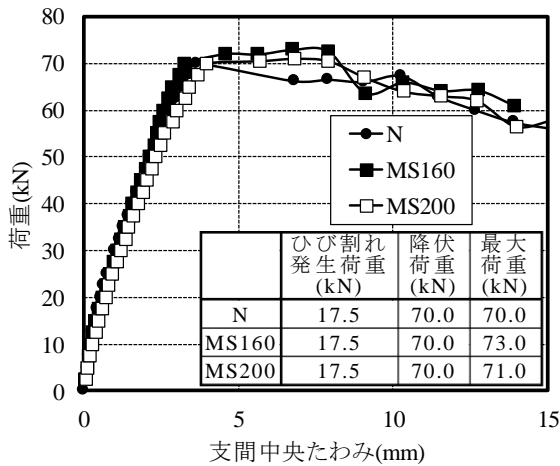


図-6 荷重と支間中央たわみの関係

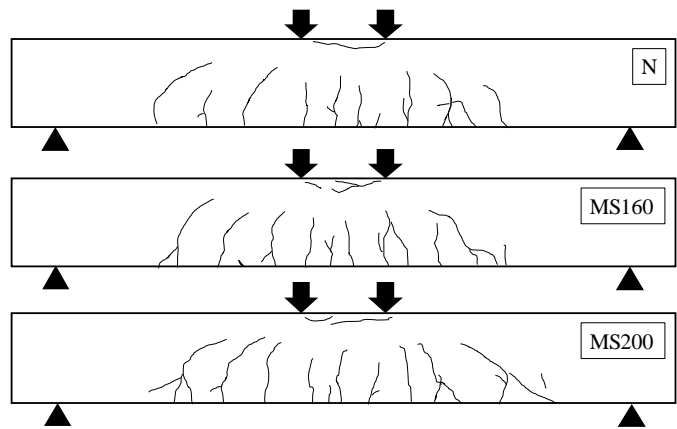


図-7 ひび割れ状況図

(実験調査によって得られた新しい知見)

本研究では、耐アルカリ性を有するエポキシ樹脂系封孔剤を施した Al-Mg 溶射鉄筋のコンクリート用補強材への適用可能性を明らかにするため、Al-Mg 溶射鉄筋のコンクリート中における耐食性ととも、コンクリート部材への適用可能性を検討するためコンクリートとの付着性および RC はりの基礎的な力学性状について実験を行った。本実験の範囲で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 耐アルカリ性を有するエポキシ樹脂系封孔剤を適量塗布することで高濃度の塩分を含有するコンクリート中において良好な耐食性が得られた。
- 2) 鉄筋の引抜き試験より、エポキシ樹脂系封孔剤を施した Al-Mg 溶射鉄筋はコンクリートとの良好な付着性を有することを確認した。
- 3) Al-Mg 溶射鉄筋を用いた RC はりの曲げ性状は、無溶射の普通鉄筋を使用した場合と比較してほとんど差異は見られなかった。

参考文献

- 1) 西日本高速道路株式会社：アルミニウム・マグネシウム合金溶射設計施工管理要領《新設橋・溶射ボルト編》、pp.1-6、2015.7
- 2) 柴田大輝、井上真澄、崔希燮、広野邦彦、杵本正信：Al-Mg 溶射鉄筋のコンクリート部材への適用性に関する基礎的研究：土木学会北海道支部論文報告集、Vol.75、E-12、2019.1

(発表論文)

- 1) 伊井龍斗、井上真澄、崔希燮、広野邦彦、杵本正信：耐アルカリ型 Al-Mg 溶射鉄筋を用いたコンクリート部材の耐食性と力学性状、令和元年度土木学会北海道支部論文報告集、Vol.76、E-23、2020.1
- 2) 井上真澄、崔希燮、広野邦彦、杵本正信：コンクリート中における Al-Mg 合金溶射鉄筋の耐食性と付着特性に関する検討、セメント・コンクリート論文集、Vol.73、pp.272-278、2020.3